

마이카-에폭시 절연재료의 열화특성분석

논문
11-2-1

The Aging Characteristic Analysis of Mica-Epoxy Insulation Materials

유영식*, 김희곤**, 송우창***, 이재형***, 박용관***

(Yeong-Sik Yoo, Hee-Gon Kim, Woo-Chang Song, Jae-Hyung Lee, Yong-Kwan Park)

Abstract

The experimental results using the X-ray technique, the position and structure of mica crystal are not observed the phase change of aging and sound specimen respectively. However, We could observe the intensity difference of crystal element in both atmospheres. The analysis of mica-epoxy materials by optical microscope are shown that the each surface of sound and aging specimens are different in both atmospheres. Also, the experimental results have shown that the potassium ions of mica crystal are substituted by hydrogen ions at boundary area of mica-epoxy and/or mica-mica. On components made of mica, a potassium ion of big atomic radius, is replaced by hydrogen ion of small atomic radius. The voids are created by the difference of radius progressed by combined stresses. Through these phenomena, it has been proposed that the conductive layers made of potassium enable the voids to form and the cracks to create by high electric field.

Key Words(중요용어): Insulation Material(절연재료), Stator Winding(고정자 권선), Mica/Epoxy(마이카/에폭시), Deterioration Phenomenon(열화현상), High Electric Field(고전계)

1. 서론

전기에너지의 공급원인 발전기의 운전중 절연파괴 사고는 전력수급에 심각한 영향을 미치게 되므로¹⁾²⁾ 운전중에 절연파괴 사고가 발생하지 않도록 유전점, 교류전류, 부분방전등의 비파괴시험 등에 의하여 절연의 열화상태를 판정하고 있으며³⁾⁴⁾⁵⁾. 특히, 부분방전의 경우 고정자권선의 국부적인 결함을 예측할 수 있어 가장 중요한 인자로 취급되고 있다. 그러나, 발전기의 고정자권선 재료인 마이카 에폭시재료는 사용조건에 다양성, 절연열화기구의 복잡성 등 여러 가지 원인에 의하여 열화상태를 정확히 판단하는 것은 어려운 실정이며 국내의 경우 선진국과는 달리 이 분야의 연구가 전무한 상태이다.⁶⁾

따라서, 발전기 고정자권선 절연재료(마이카-에폭

시)의 열화현상을 규명하여 정확한 수명을 예측할 수 있도록 재료의 열화특성을 분석하는 것은 경제적, 학술적인 가치가 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 공기 및 수소 분위기에서 가속열화되어 절연파괴된 발전기 고정자권선 절연재료인 마이카-에폭시 절연재료의 건전시편과 열화시편에 대하여 광학현미경에 의한 표면분석을 하였고 X-Ray 분석법을 이용하여 마이카결정구조를 분석함으로써 복합재료 내에서 발생하는 열화특성을 관찰하고자 하였으며, SEM, EDAX기법을 이용하여 크랙의 발생 및 성장과정 그리고 성분분석을 통하여 마이카-에폭시 절연재료의 열화현상을 규명하고자 하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

본 논문에서 사용된 고정자권선은 500MVA, 22kV (상전압 12.7kV)급 수냉식 화력용 권선으로 그림 1은 직선형으로 설계 제작된 권선으로 효성중공업에서 제작된 수소용기내의 실험장면을 모의한것이다. 또한, 공기중에서의 전기적열화 실험과 비교 하기 위하여, 가압수소상태(4kg/cm²)에서 고정자권선의 전기적

* : 여주전문대학 전기과

** : 전력연구원

*** : 성균관대학교 전기공학과

(경기 수원시 장안구 천천동 300, Fax:0331-292-8662)

1997년 5월 15일 접수, 1997년 12월 16일 심사완료

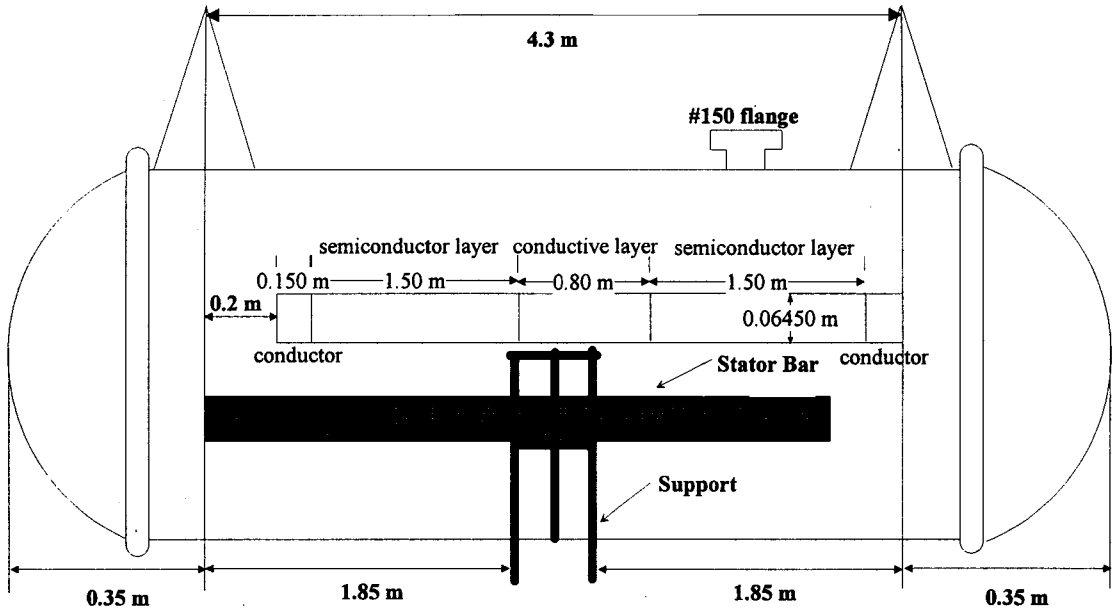


그림 1. 시험용 고정자권선 및 수소용기의 치수

Fig. 1. The dimensions of stator winding and Hydrogen chamber used by testing

열화를 측정할 수 있도록 가압수소 Chamber를 제작하여 Chamber내의 고정자권선에 420Hz, 27.5 kV/mm(77kV급 bushing)를 인가하였다.

시편은 그림 1과 같이 소선의 규격 4.27×7.14mm, state bar의 규격 30.75×54mm의 고정자권선에 마이카-에폭시 테이프를 1/2씩 겹쳐지게 14회 감고 컴파운드 탱크에 인입하여 130℃에서 경화시킨 후 에폭시 도전성 접착제를 도포하여 결정된 유리테이프를 감고 8시간 이상 대기중에서 건조시켰다. 또한 저저항 페인트를 state bar에 칠하고 아암부에는 고저항 페인트를 칠하여 최종 state bar의 치수를 41×64.5mm로 하였다.

고정자권선의 통상적인 절연설계는 2kV/mm ~ 3kV/mm사이에서 운전하도록 설계되어 있어 전기적 가속열화는 전압을 높여서 시험하는 것이 일반적인 방법이지만 가속열화 전압을 너무 높여서 6kV/mm 이상이 될 경우에는 정상적인 열화과정으로 진행되지 않으므로 제작된 권선에 인가되는 전압을 수소압력하에서 열화가 발생하지 않는 한계값인 5.5kV/mm (인가전압 27.5kV, 권선절연두께 5mm)로 정하여 실험하였다.

그러나, 이와같은 전압에서의 권선의 수명은 100,000시간을 초과하는 장기 열화시간이 소요되므로 권선의 수명이 인가전압의 주파수에 반비례한다⁷⁾는 것을 이용하여 주파수를 420Hz로 높여 권선의 평균수명이 20,000시간 이내가 되도록 하였다. 주파수 가속열화를 위한 장치는, 420Hz의 주파수를 발생하기 위한 M-G Set(William I. Horlick Co.)과 50kV까지의 고전압 발생장치용 전력용 변압기 및 제어장치(AVO Biddle instruments Co.)로 그림 2와 같이 구성하였다.

M-G 시스템의 입력은 삼상 200V, 80A, 60Hz이며 출력은 단상 480V, 420Hz이다. 전력용 변압기는 50kV, 1A, 420/60Hz 겸용으로 사용할 수 있도록 설계되어 있어 가속열화시와 열화특성 측정시에 모두 사용할 수 있도록 설계하였다.

수소중 가속열화실험은 4 kg/mm²의 가압수소 탱크안에서 실시하며 2000시간마다 한 번씩 수소를 방출하고 공기중에서의 부분방전 측정치와 가압수소중에서 부분방전 측정치를 상호 비교 하였다.⁸⁾

3. 결과 및 검토

3-1. X-ray 분석

마이카 결정의 결정구조와 결정상태, 즉 원자의 배열과 관계가 있는 상변화 정보를 살펴보기 위하여 X-Ray Diffractometer (RIGAKU D/MAX-RC, D/

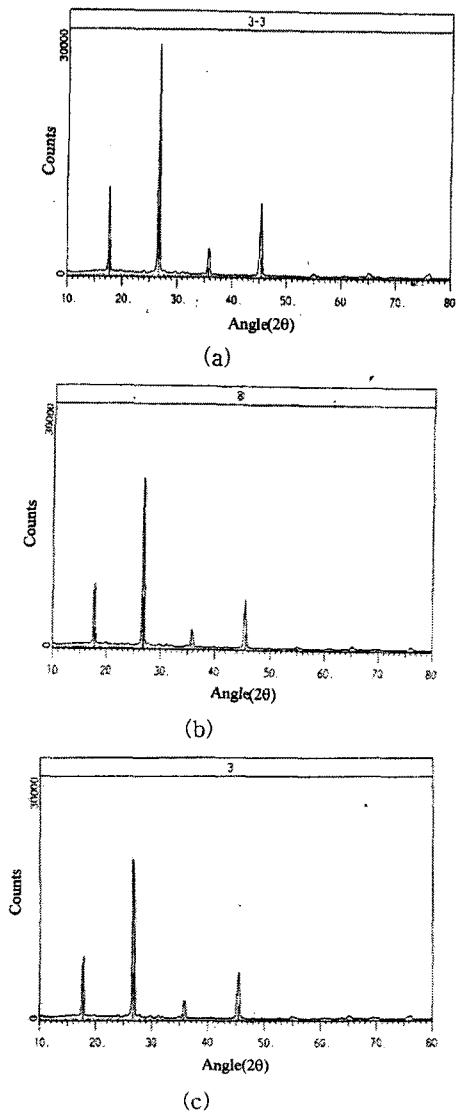


그림 2. 건전 시편과 열화시편(수소중과 공기중)의 X-ray 비교분석

Fig. 2. The X-ray comparative analysis of sound and aging samples(under air and hydrogen)

MAX-III)를 이용하였으며 X선 회절에 사용되는 X선의 파장은 Co를 Source로 이용하였다.

물질을 구성하는 원자에 의해 만들어지는 회절현상은 원자의 배열방법과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 X선 회절패턴으로 부터 마이카결정의 구조에 대한 중요한 정보를 획득하고 상의 변화를 관찰할 수 있다.⁹⁾ 그림 2는 각 시편에 대한 X-ray 분석 결과를 나타낸 것이다. 이것은 공기중 열화시편과 건전시편사이에 어떠한 상의 변화는 관찰되지 않았지만 강도의 차이가 보인다. 즉 공기중 건전시편의 경우 26.704° 부근에서 최대강도인 27,481 count/sec를 나타내며, 공기중열화 시편의 경우는 26.776° 부근에서 최대강도인 20,853 count/sec, 그리고 수소중 열화시편의 경우 26.736° 부근에서 최대강도인 19,827 count/sec로서 수소중 열화시편이 가장 낮은 값을 보이고 있다. 또한, 결정면과 면사이의 거리도 건전시편의 경우 5.003Å을 나타내고 있으며 공기중 열화시편이 3.330Å, 수소중 열화시편이 3.334Å으로 단위셀의 크기가 열화에 의해 축소됨을 알 수 있다.

그림 3은 Mica의 변형인 Illite(system : Monoclinic, a=5.19Å, b=9.00Å, c=20.16Å, α=, β=95.18, γ=, d=3.34Å(0 0 6))의 표준값과 비교한 그림으로 시험시편의 값과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, 그림 4는 Mica(Muscovit; system : Monoclinic, a=5.189Å, b=8.95Å, c=20.097Å, α=, β=95.18, γ=, d=3.35Å(0 2 4))를 표준값과 비교한 그림으로써 각 성분의 강도가 Illite에 비하여 약간의

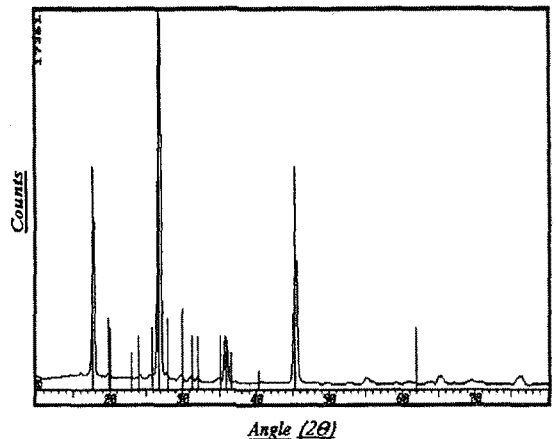


그림 3. X-ray 결과와 표준값의 비교(Illite 26-991, (K,H₃O)Al₂(OH)₂Si₃AlO₁₀)

Fig. 3. The comparison of X-ray results and standard data

차이를 나타내고 있다.

이것은 고정자권선 제작시 상의 변화가 있었음을 나타내는 것으로 Mica의 경우 외부에서 에너지가 주어지면 화학적인 반응에 의하여 상변화가 가능하다는 것을 알 수 있고 고정자권선의 재료가 Muscovite에서 Illite로 상변화가 발생할때 권선재료의 열화에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 앞으로 연구가 더욱 진행되어야 하며 상변화시 발생하는 화학적인 반응도 고려하여야 할 것으로 생각된다.

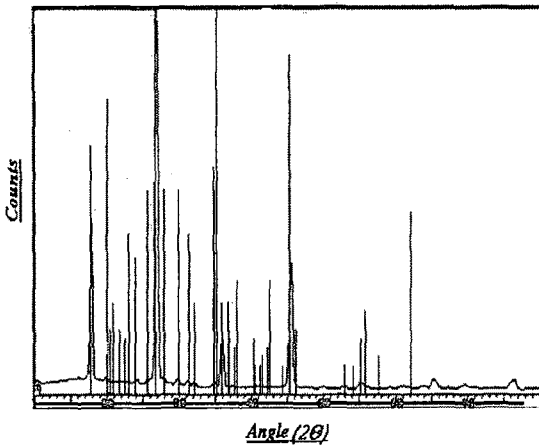


그림 4. X-ray 결과와 표준값의 비교(muscovite 7-32, $KAl_2(OH)_2Si_3AlO_{10}$)

Fig. 4. The comparison of X-ray results and standard data

3-2. Mica-Epoxy 고정자권선 재료의 광학현미경에 의한 표면관찰

Mica-Epoxy 고정자권선 재료의 표면상태를 관찰하기 위하여 각 시편에 대하여 광학현미경($\times 400$)으로 관찰하였고, 그 결과를 그림 5~7에 나타내었다.

그림 5의 건전시편의 경우 비교적 재료의 상태가 양호하며 시편제작상의 열화에 의한 흔적들을 발견할 수 있으며, 공기중 열화시편의 경우 그림 6과 같이 마이카와 마이카, 마이카와 에폭시 사이의 전단응력과 열응력에 의한 미끌림현상을 관찰할 수 있었다.

수소중 열화시편인 그림 7를 살펴보면 공기중에서 열화된 시편그림에 비하여 크랙을 포함한 열화의 흔적이 많이 나타남을 볼 수 있는데, 이것은 마이크로 크랙들이 건전시편에서 매끄럽게 보였던 부분에 생성되어 있음을 확인할 수 있다.

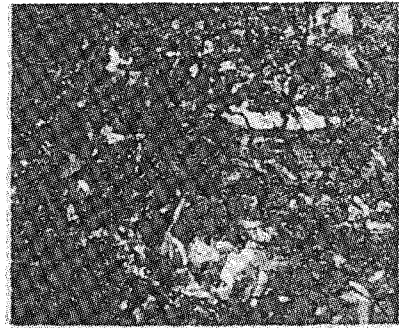


그림 5. 건전시편의 광학현미경에 의한 표면 분석

Fig. 5. The surface analysis by optical microscope of sound samples

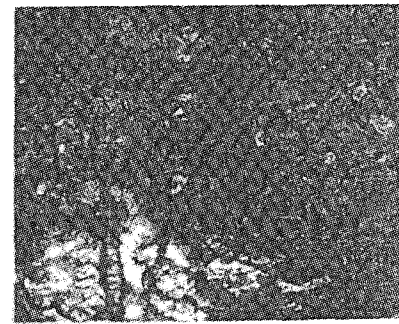


그림 6. 공기중 열화시편의 광학현미경에 의한 표면 분석

Fig. 6. The surface analysis by optical microscope of aging samples in air

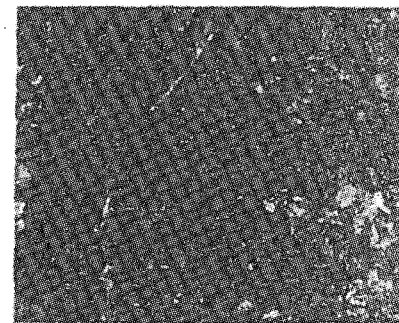


그림 7. 수소중 열화시편의 광학현미경에 의한 표면 분석

Fig. 7. The surface analysis by optical microscope of aging samples in hydrogen

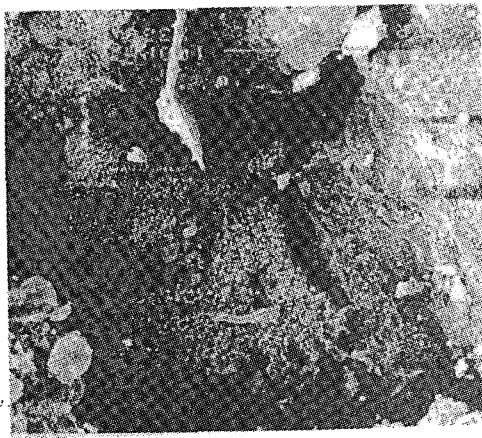
3-3 SEM 및 EDS 분석

공기중 및 수소중에서 절연파괴 및 열화된 시편과 건전시편의 샘플에 대해 SEM 과 EDS로 관찰하여 그림 8~13에 나타내었다. SEM은 일본 JEOL사의 JSM-6400 모델을 이용하였으며 EDS는 영국 OXFORD사의 6209 모델을 사용하였다.

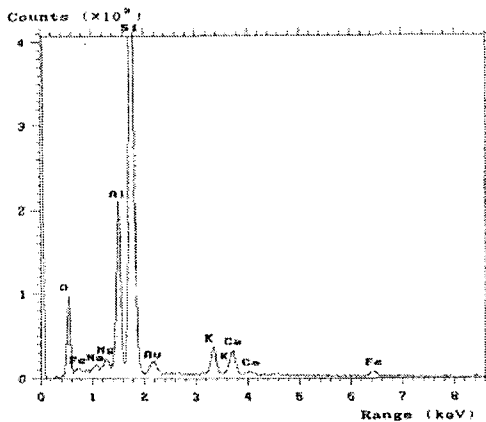
그림 8~11은 각각의 상태에서 절연파괴된 시편의 동도체측과 외부전극측의 측정결과인데, 공기

전될수록 부분방전의 영향이 크다고 생각되는 반면 수소중의 절연파괴 시료는 동도체측의 크랙의 크기가 크다. 이것은 수소압력의 영향으로 부분방전의 발생이 억제됨을 알 수 있다.

또한, 공기중 절연파괴를 나타내는 그림 8은 외부전극측 시편의 절연파괴된 부분을 SEM 및 EDS를 이용하여 관찰한 결과로서, Al, Si, K등의



(a)

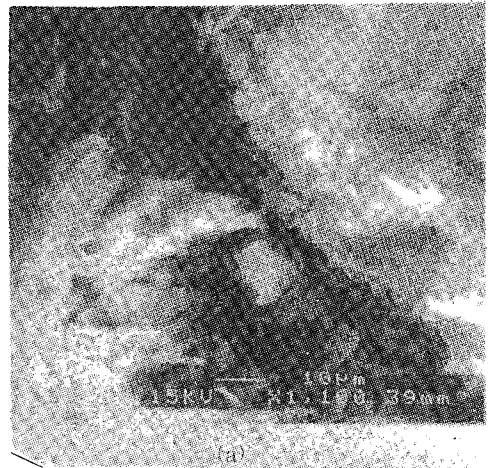


(b)

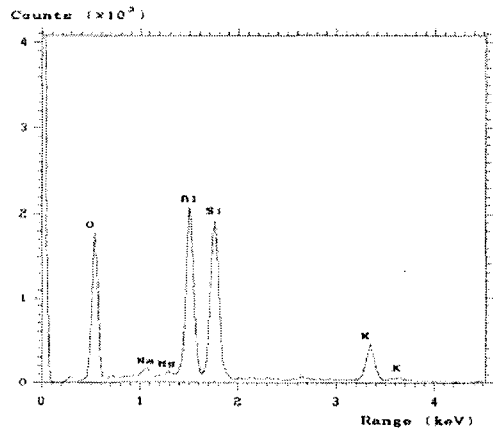
그림 8. 공기중 절연파괴 시편의 SEM 과 EDS분석 (외부전극측)

Fig. 8. The EDS and SEM analysis of breakdown sample in air (Core side)

중인 경우 동도체측의 크랙의 크기는 1-5 μ m인데 비하여 외부전극측의 크랙은 50-100 μ m로서 외부로 진



(a)



(b)

그림 9. 공기중 절연파괴 시편의 SEM 과 EDS분석 (동도체측)

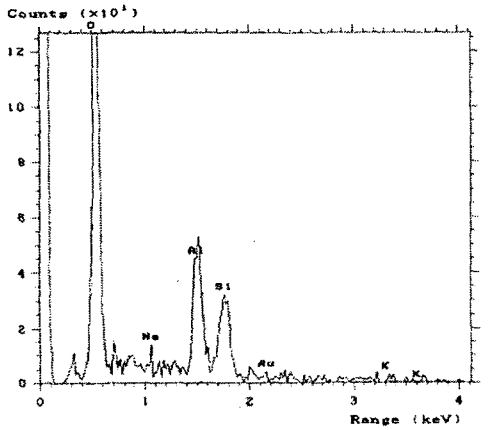
Fig. 9. The EDS and SEM analysis of breakdown sample in air (copper side)

마이카 성분요소가 나타나 있으며 크랙의 직경은 대략 10-20 μ m 정도이며 길이가 200-400 μ m 로 관찰되었다. EDS 분석결과를 살펴보면 공기중 절연파괴시

료의 경우 Na, Mg, Fe, Ca 등의 금속성분이 검출되었고 이것은 공기중에 함유된 금속성분이 절연파괴시 부분방전의 열에 의해 이온화되어 복합재료 마이카성분의 K와 대체되어 나타난 것으로 생각되며 특히 Na는 1가의 원소로써 K와 교체되어 판상의 마이카층을 결합시키고, Ca는 2가의 원소로서 K와 대체되어 마이카를 구성하고 마이카의 상을 바꾸는 역할을 하는 요소로 생각된다.¹⁰⁾¹¹⁾



(a)



(b)

그림 10. 수소중 절연파괴 시편의 SEM 과 EDS분석 (외부전극측)

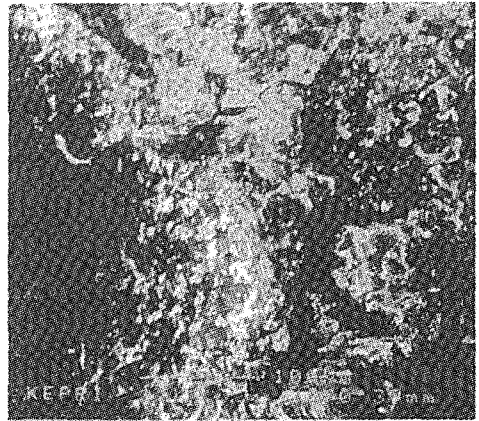
Fig. 10. The EDS and SEM analysis of breakdown sample in hydrogen (Core side)

또한, 철성분과 마그네슘 성분이 공기중에서 이온화

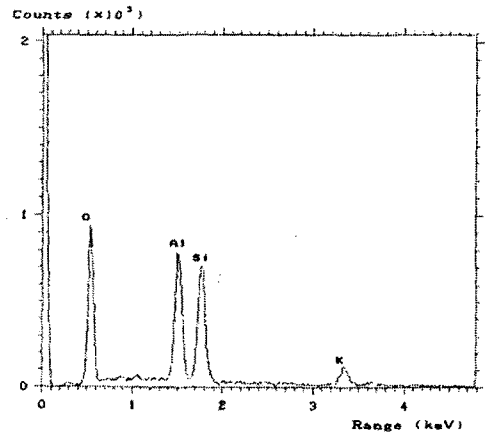
되어 규소나 알루미늄성분과 교체되고 이것이 실험 결과로 나타난 것으로 생각된다.

그림 10의 수소중 절연파괴 시료에 대한 SEM 및 EDS의 관찰 결과는 직경이 대략 1-5 μ m 정도이며 길이가 10-50 μ m 로 공기중 절연파괴 시료에 비하여 크랙의 크기가 작음을 볼 수 있었다.

그림 12, 13은 SEM에 의한 건전시료의 표면관찰 및 EDS의 관찰결과로서 공기중 건전시료의 경우 표면의 거칠기가 비교적 양호한 상태를 나타내고 있으



(a)

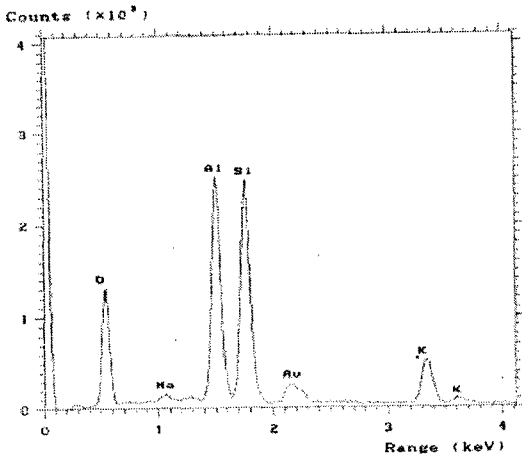
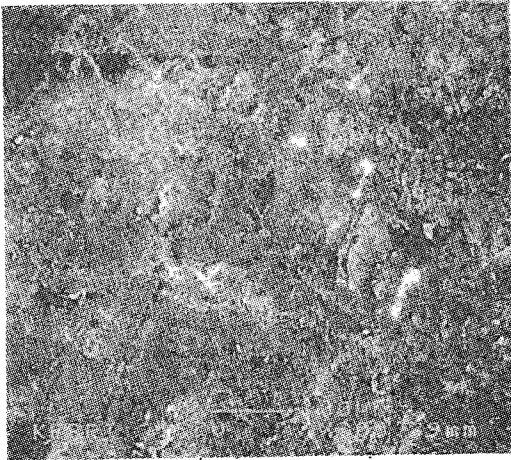


(b)

그림 11. 수소중 절연파괴 시편의 SEM 과 EDS분석 (동도체측)

Fig. 11. The EDS and SEM analysis of breakdown sample in hydrogen (copper side)

나 수소중 건전시료의 경우 표면이 수소중에 장기간 보존됨으로써 수소이온과 물이온에 의하여 Mica를 구성하는 포타시움이온(K⁺)과의 자리바꿈에 의하여 마이카조각이 들떠있음

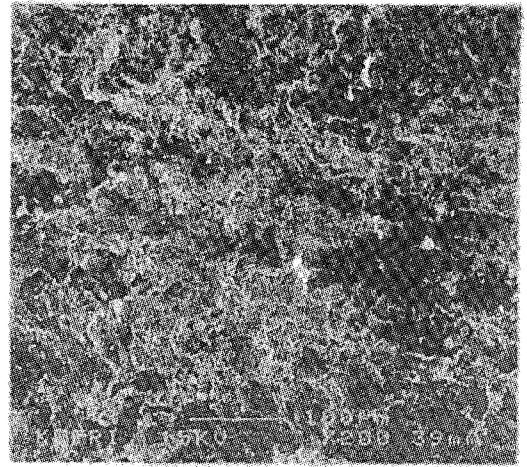


(b)

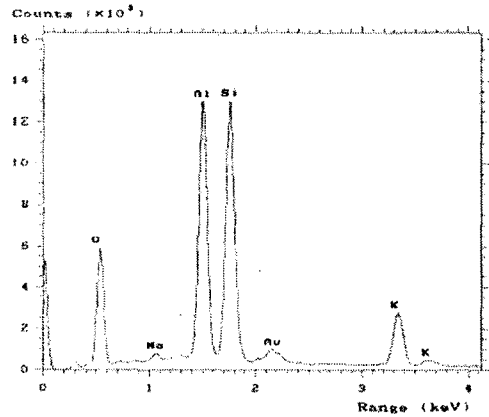
그림 12. 공기중 건전 시편의 SEM 과 EDS분석
Fig. 12. The EDS and SEM analysis of sound sample in air

4. 결 론

대용량 발전기 고정자권선에 이용되는 MICA/EPOXY 복합 절연재료의 경년열화에 대한 현상을



(a)



(b)

그림 13. 수소중 건전 시편의 SEM 과 EDS분석
Fig. 13. The EDS and SEM analysis of sound sample in hydrogen

절연과피된 시편의 분석을 통해 규명하기 위하여 광학현미경, X-ray, SEM, EDS등으로 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 공기중 및 수소중의 분위기하에서 각각 절연과피된 시편의 분석결과 공기중에서 파피된 시편의 경우보다 수소중에서 파피된 시편이 수소이온과 수소압력(4kg/cm²)의 영향으로 판상의 마이카를 구속하고 있는 카리움(K⁺)과 수소이온(H⁺)의 대체에 의하여 마이크로크랙들이 많이 발생한다는 것을 관찰할 수 있었다.

(2) 마이카 결정의 구조와 상태를 파악하기 위하여 각 시편의 X-Ray를 분석한 결과, 각각의 분위기에서 열화된 시편과 건전시편의 상 변화는 관찰되지 않았지만 결정원소의 강도차이가 있음을 확인하였고 수소중 열화시편의 경우가 가장 낮았다.

(3) 광학 현미경에 의한 표면분석 결과, 열화시편의 경우 마이카와 마이카, 마이카와 에폭시간에 전단응력과 열응력에 의한 미끌림 현상이 관찰되었다.

(4) 공기중에서 절연파괴된 시편의 동도체측과 외부전극측의 크랙의 크기는 외부전극측이 훨씬 큰 반면, 수소중에서 절연파괴된 시편은 수소압력의 영향으로 인해 외부전극측의 크랙의 크기가 동도체측의 크랙의 크기보다 작았다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사와 기초전력공학 공동연구소가 주관하는 전력기술 기초연구 지원사업에 의한 연구비로 수행되었음. 과제관리번호 : I-E 95100

참 고 문 헌

- 1) 한국전력공사 발전처, "발전소 고장정지사례집", 덕수상사, pp 50-62, 1996
- 2) 신영주, "발전기 고정자 냉각수 누설고장 예방대책", 한국전력공사 발전처, 1996
- 3) 原田達哉 外, "高電壓試驗 HANDBOOK",

日本電氣學會 絶縁試験法 HANDBOOK 改訂委員会", 1981

- 4) 김희곤 외, "수력발전기 고정자권선의 절연수명 평가기준 설정에 관한 연구", 전기학회하계학술대회 논문집 C, pp 1769-1773, 1996
- 5) 金子英男 "電力機器の 絶縁余壽命推定法の 現狀", 日本電氣學會論文誌 A, 114券, 12号, 1994
- 6) 김희곤, "대형발전기 고정자권선 절연재료의 열사이클에 의한 열화에 관한 연구" 대한전기학회 논문집 45-4-13, pp553-557, 1996
- 7) A. M. Breitenstein, "Accelerated Frequency Hydrogen-Atmosphere Voltage Endurance Testing of Micaceous Insulation Systems", IEEE Trans. PAS, pp1389-1393, 1969
- 8) J. B. Kim, "The Effects of Hydrogen Pressure on Partial Discharge Spectroscopy in Turbine Generator Winding Insulation", Proc. of ICEE '96, Vol 2, pp287-293, 1996
- 9) International Centre for Diffraction Standard Data, " X-ray Standard Data", No.07-0032, 26-0911, JCPDS, 1994
- 10) 김희곤, "A study on the breakdown mechanism of rotating machine insulation", J. of EEIS, Vol.2, No.3, 1997.6
- 11) 김희곤, "A study on the insulation breakdown of mica epoxy composites", 전력연구원 전력지, 제14권, 제1호, pp14-28, 1997.4